Arief Budiman

DISTILASI

Teori dan Pengendalian Operasi

Arief Budiman

DISTILASI

Teori dan Pengendalian Operasi

Gadjah Mada University Press

DISTILASI: TEORI DAN PENGENDALIAN OPERASI

Penulis
Arief Budiman

ISBN : -

Korektor:
Devi dan Fara

Desain sampul:
Pram's

Tata letak isi:
Junaedi

Diterbitkan digital atas kerjasama Grasindo dengan Gadjah Mada University Press, Anggota IKAPI, Jakarta 2017.

KATA PENGANTAR

Ada tiga tahapan dalam industri kimia saat mengolah bahan baku menjadi produk. Diawali dengan tahapan penyiapan bahan, dilanjutkan proses reaksi di dalam reaktor, dan diakhiri dengan pemurnian produk. Ada bermacam-macam alat yang dapat dipakai dalam tahap pemurnian produk, tetapi jika produknya berupa campuran bermacam-macam cairan, biasanya dipakai alat yang disebut menara distilasi. Para engineers selalu memberikan perhatian yang berlebih saat merancang ataupun mengoperasikan menara distilasi, mengingat alat ini mengonsumsi energi yang cukup banyak. Penghematan energi, dalam hal ini tentunya akan mengurangi biaya operasional pabrik secara keseluruhan.

Buku ini ditulis dengan harapan pembaca mempunyai wawasan yang komprehensif terkait menara distilasi mulai dari perancangan, analisis termodinamika, dan operasi menara. Pada Bagian A dipaparkan tentang perancangan menara distilasi, baik untuk campuran biner maupun campuran multikomponen. Pada Bagian B disajikan berbagai macam konfigurasi menara distilasi hemat energi. Pada Bagian C diuraikan tinjauan termodinamika dari menara distilasi. Pada Bagian D dipaparkan berbagai problem operasional saat menara distilasi dijalankan, serta instrumentasi dan alat-alat aksesori menara distilasi. Juga disajikan cara mengoperasikan menara distilasi, mulai dari komisioning, *start-up*, hingga *shut-down*.

Pada kesempatan ini, penyusun ingin menyampaikan terima kasih kepada: 1) Ni'mah Ayu Lestari, S.T., Naomi Ratrianti, S.T., dan Yano Surya Pradana, S.T., M.Eng. yang telah membantu menyiapkan penyusunan buku ini; 2) Mahasiswa-mahasiswa S-1, S-2, dan S-3 yang tergabung dalam *Process System Engineering Research Group* (PSErg), Jurusan Teknik Kimia FT UGM yang selalu memberi inspirasi dalam pengembangan *sustainable technology*; dan 3) Kolega-kolega yang selalu men-*support* sehingga buku ini dapat kami selesaikan.

Terakhir, kami ingin menyampaikan permohonan maaf jika dalam penyusunan buku ini masih banyak kelemahan. Tentunya, masukan dan saran sangat kami harapkan agar edisi selanjutnya dapat lebih sempurna.

Yogyakarta, November 2015
Penulis

Prof. Arief Budiman, D.Eng.

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL

DAFTAR GAMBAR

A. PENGANTAR DISTILASI

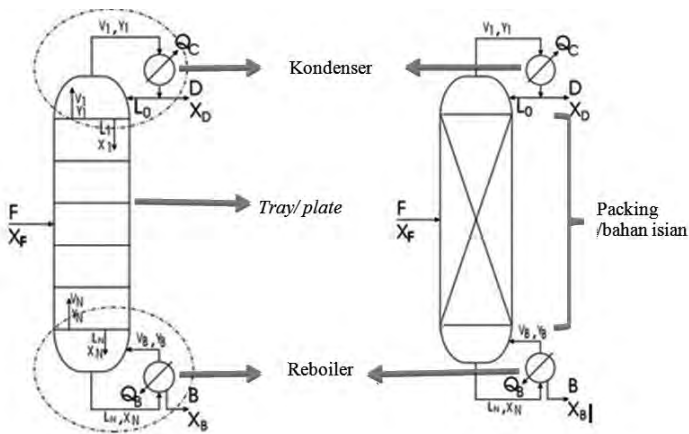
1. PENGANTAR PROSES PEMISAHAN

Pemisahan merupakan suatu proses yang sangat penting untuk dipelajari dalam bidang teknik kimia. Dalam proses sintesa di suatu industri diinginkan suatu produk dengan kemurnian tertentu atau diperlukan pula bahan baku dengan kemurnian tertentu. Melalui proses pemisahan, diharapkan dapat diperoleh produk komponen tertentu dari suatu campuran dengan kemurnian setinggi mungkin. Di dalam teknik kimia dikenal beragam jenis proses pemisahan, bergantung pada fase penyusun campuran yang akan dipisahkan. Campuran yang terdiri atas satu fasa saja disebut campuran homogen, sedangkan campuran yang terdiri atas dua fasa atau lebih disebut campuran heterogen. Pemisahan campuran homogen dapat dilakukan dengan berbagai macam cara, di antaranya evaporasi, distilasi, ekstraksi, kristalisasi, absorpsi, presipitasi, dan lain sebagainya. Dalam buku ini akan difokuskan pembahasan detail mengenai pemisahan fase homogen dengan cara distilasi.

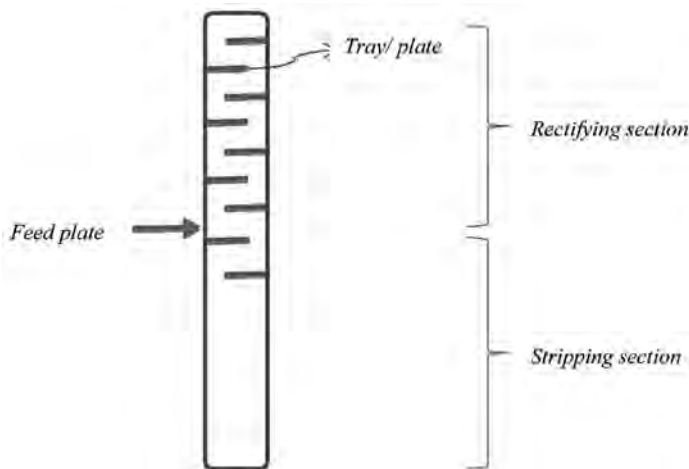
Distilasi adalah proses pemisahan suatu campuran yang didasarkan pada perbedaan titik didih dan tekanan uap yang cukup signifikan. Suatu campuran komponen cair-cair yang saling larut dan keduanya merupakan komponen yang volatil, tetapi memiliki perbedaan titik didih yang cukup signifikan maka dapat dipisahkan dengan cara distilasi. Umpan pada proses distilasi dapat berupa campuran biner (campuran 2 komponen) atau campuran multikomponen yang terdiri atas fase cair saja atau campuran uap dan cairan. Komponen yang paling volatil dalam campuran tersebut akan membentuk fase uap dan diperoleh sebagai produk atas pada menara distilasi, sering kali disebut dengan istilah *light key component*. Sementara itu, komponen yang kurang volatil pada campuran akan tetap berada di fase cair dan diperoleh sebagai produk bawah pada menara distilasi, dikenal dengan istilah *heavy key component*.

Distilasi kali pertama diperkenalkan oleh seorang ilmuwan asal Yunani pada abad pertama tahun masehi. Lambat laun perkembangannya makin pesat disebabkan tingginya permintaan akan spiritus. Distilasi modern diperkenalkan

oleh ahli-ahli kimia Islam pada masa kekhalifahan Abbasiyah. Beberapa tokoh Islam tersebut di antaranya Al Razi yang memisahkan alkohol menjadi senyawa yang relatif murni melalui alat yang dinamakan alembik. Kemudian Ibnu Jabir yang juga telah banyak menemukan beberapa alat dan proses kimia yang hingga saat ini masih dipergunakan. Uraian teknik penyulingan juga telah diperkenalkan oleh Al Kindi.

Menara distilasi berbentuk vertikal, terdiri atas kondenser yang terpasang di bagian paling atas menara, reboiler di bagian paling bawah dan *plate*/*tray/packing* yang terdapat di sepanjang menara. Di dalam menara distilasi terjadi proses penguapan dan pengembunan yang berulang-ulang melalui pertukaran panas yang terjadi pada kondenser, reboiler, dan kontak uap-cair sepanjang menara. Pada Gambar 1.1 disajikan skema menara distilasi dengan *plate* dan bahan isian.

Gambar 1.1 Menara distilasi dengan *plate* (kiri) dan menara distilasi bahan isian (kanan)

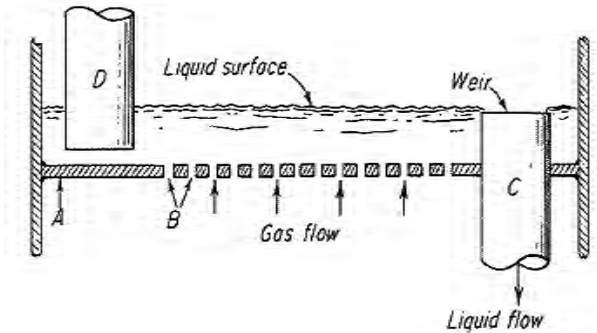
Menara distilasi dibagi menjadi 2 bagian utama, yaitu seksi *rectifying*/*enriching*/*absorption* (bagian atas) dan seksi *stripping*/*exhausting* (bagian bawah) seperti terlihat pada Gambar 1.2. Pada seksi *enriching* terjadi pencucian oleh *liquid* guna menghilangkan atau menyerap komponen yang kurang volatil. Dinamakan seksi *enriching* karena di kolom paling atas kaya akan kandungan uap komponen yang paling volatil. Pada seksi *stripping*, cairan di-*strip* dari komponen volatil dengan menghasilkan uap dari dasar kolom melalui penguapan parsial dari cairan pada reboiler. Umpan biasanya dimasukkan melalui bagian tengah menara. *Tray* tempat umpan dimasukkan disebut sebagai *feed plate*. Seksi *enriching* meliputi semua *plate* yang berada di atas *feed plate*, sedangkan seksi *stripping* meliputi semua *plate* yang ada di bawah *feed plate*. *Tray* dinomori urut dari atas yang dimulai dengan nomor kecil hingga ke *tray* yang paling dasar. Uap dan cairan yang terdapat pada

masing-masing *tray* selalu berada pada *dew point* dan *bubble point*-nya. Titik didih campuran berada di antara *bubble point* dan *dew point* tersebut.

Gambar 1.2 Pembagian seksi *rectifying* dan *stripping* pada menara distilasi tanpa reboiler dan kondenser

Proses distilasi melibatkan beberapa komponen dalam teknik kimia, di antaranya adalah sebagai berikut.

1. Keseimbangan fasa, yaitu terjadi pada *tray*/*plate* yg fase cair dan uapnya saling berkontak.
2. Perpindahan massa dan panas yang terjadi pada setiap *stage*, termasuk pada reboiler maupun kondenser yang dipasang di bagian bawah dan atas menara.
3. Penguapan dan pengembunan yang terjadi pada reboiler dan kondenser sehingga di dalam kolom terdapat 2 fasa yang mengalami kesetimbangan.
4. Perpindahan momentum.

Sesaat setelah umpan dimasukkan ke dalam *feed plate*, umpan yang berwujud cair akan turun ke bawah menara melalui *downcomer* disebabkan adanya gravitasi. Cairan tersebut akan masuk ke reboiler dan di dalam reboiler mengalami pemanasan serta penguapan. Uap yang dihasilkan selanjutnya akan dikembalikan melalui *stage* di atas reboiler. Uap tersebut akan naik terus sepanjang kolom hingga mencapai *rectifying section*. Sebagian cairan yang menggenangi reboiler akan dikeluarkan sebagai produk bawah/residu yang disebut produk *bottom*. Uap yang naik hingga ke *tray* teratas akan masuk ke dalam kondenser dan mengalami pengembunan. Sebagian embunan tersebut dikembalikan ke dalam kolom, sedangkan sebagian lagi diambil sebagai

produk distilat. Embunan yang dikembalikan tersebut akan bercampur dengan cairan dari umpan kemudian berkontak dengan uap dan mengalami keseimbangan fasa pada tiap-tiap *plate*. Perbandingan antara embunan yang dikembalikan ke dalam kolom terhadap embunan yang diambil sebagai distilat disebut sebagai *reflux ratio*.

Gambar 1.3 Bagian *plate* kolom distilasi

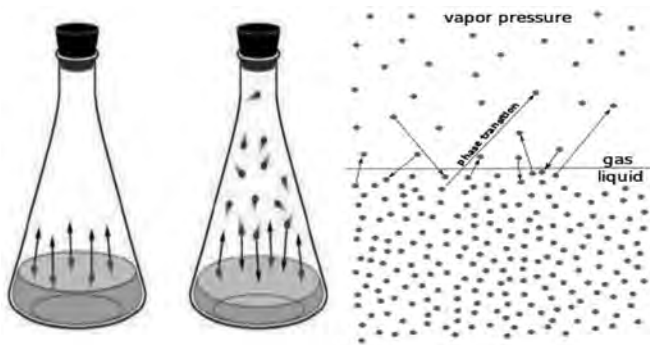
Gambar 1.3 adalah skema bagian *plate* dari menara distilasi. Dalam gambar ini A merupakan *plate*, B adalah lubang perforasi, C adalah *downcomer* menuju *plate* di bawahnya dan D adalah *downcomer* dari *plate* di atasnya.

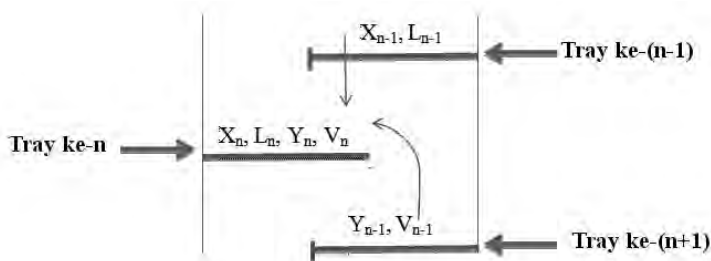
2. OPERASI *STAGE* SEIMBANG

2.1 Konsep Keseimbangan

Istilah keseimbangan dalam ilmu teknik kimia diartikan sebagai suatu kondisi pada suatu sistem yang tidak lagi memiliki kecenderungan untuk berpindah dari kondisi saat itu. Sistem yang tidak seimbang cenderung akan mengalami perubahan spontan menuju ke arah keseimbangan. Keseimbangan terbagi atas 3 jenis, yaitu sebagai berikut.

1. Keseimbangan termodinamika, yaitu suatu kondisi di dalam sistem tidak lagi terdapat *driving force* perubahan panas ($\Delta T = 0$).
2. Keseimbangan mekanis, yaitu dalam suatu sistem tidak terjadi perubahan gaya ($\Delta P = 0$).
3. Keseimbangan fase

Konsep keseimbangan fase dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Gambar 2.1 Konsep keseimbangan fasa

Umpan yang akan dipisahkan terdiri atas komponen cair yang mudah menguap dan yang tidak terlalu mudah menguap. Pada setiap *plate* menara distilasi terjadi keseimbangan antara fase uap dan cair. Menara distilasi dioperasikan pada suhu antara *bubble point* dan *dew point*. Untuk suatu campuran *liquid*, tidak dikenal istilah titik didih dan titik pengembunan. Melainkan *dew point* dan *bubble point*. Istilah titik didih dan titik embun hanya dipergunakan untuk senyawa murni. *Dew point* adalah suhu pada suatu senyawa campuran mulai membentuk embunan kali pertama, sedangkan *bubble point* adalah suhu suatu senyawa campuran mulai membentuk gelembung kali pertama. Komponen yang mudah menguap akan lebih banyak menguap dibandingkan komponen yang tidak mudah menguap. Komponen yang tidak mudah menguap tersebut dapat dipungut sebagai hasil bawah (*bottom*). Selanjutnya, uap yang kaya akan komponen lebih volatil akan naik sepanjang kolom membawa panas dengan jumlah tertentu. Skema beberapa *tray*/*plate* pada menara distilasi dapat dilihat pada Gambar 2.2.

Gambar 2.2 Kesetimbangan uap-cair pada *stage* kolom distilasi

Umpan yang akan dipisahkan dimasukkan ke *tray n* pada kolom distilasi. Umpan berfase cair jenuh. Uap yang berasal dari *tray* di bawahnya, yaitu *tray* ke (n+1) akan naik ke *tray* ke-*n*. Uap tersebut membawa panas

dan komponen yang lebih mudah menguap. Panas tersebut akan diserap oleh *liquid* yang berada di *tray* ke-*n* sehingga komponen yang lebih volatil berubah menjadi uap. Sementara itu, sebagian uap akan ada yang terkondensasi menjadi cair karena melepas sejumlah panas. Dari *tray* ke (n-1), cairan akan turun menuju *tray* ke-*n*. Kandungan senyawa yang lebih volatil dalam cairan tersebut akan ikut menguap disebabkan panas yang dibawa oleh uap dari *tray* n+1. Akibatnya, konsentrasi X pada *tray* ke-*n* menjadi berkurang. Semakin ke bawah, konsentrasi X akan semakin berkurang, sedangkan *liquid* yang berubah menjadi uap akan semakin memperkaya konsentrasi uap Y pada *tray* ke-*n*. Semakin ke atas, konsentrasi Y akan semakin meningkat. Akibatnya, diperoleh hubungan:

$$X_{n-1} > X_n \text{ dan } Y_n > Y_{n+1}$$

Pada *tray* ke-*n* interaksi antara fase uap dan cair cenderung mengarah pada keseimbangan. Sebagian uap yang ada mengembun, sebagian cairan yang ada juga menguap sehingga tidak ada lagi perubahan komposisi uap cair pada *tray* tersebut. Begitu pula dengan panas dan massa cenderung mengalami perubahan dan perpindahan menuju keseimbangan sehingga tidak ada lagi perubahan terkait suhu ataupun jumlah komponen pada *tray* tersebut.

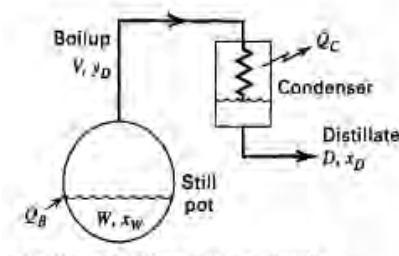
2.2 Distilasi *Batch*

Sebagaimana operasi sistem *batch* pada umumnya, distilasi *batch* juga dijalankan untuk sekali proses. Umpan dimasukkan ke menara distilasi untuk dipisahkan dari komponen-komponen penyusunnya. Kemudian semua produk akan diperoleh di akhir proses. Kebanyakan proses akan lebih ekonomis apabila dijalankan dengan sistem kontinu. Dahulunya, proses *batch* identik dengan jenis proses yang konvensional. Namun, terdapat beberapa alasan mengapa proses distilasi batch ini tetap dijalankan hingga saat ini. Beberapa alasan tersebut, di antaranya adalah sebagai berikut.

1. Untuk proses produksi yang berkapasitas kecil akan lebih ekonomis apabila dijalankan pada operasi *batch*.
2. Untuk jenis bahan baku yang bersifat musiman diperlukan operasi *batch* dalam menghasilkan produk yang diinginkan.
3. Pada tahap evaluasi pemisahan suatu bahan untuk menghasilkan suatu produk pada skala laboratorium.
4. Proses yang melibatkan bahan baku yang bersifat korosif memerlukan penggantian dan perawatan alat yang intensif setiap saat sehingga operasi *batch* dimungkinkan lebih efisien.
5. Umpan yang mengandung suatu solid, tar, atau resin yang berpotensi untuk menyumbat atau tersangkut pada kolom distilasi.

6. Produksi *fine product* atau *specialty product*, seperti produk farmasi, minuman beralkohol hasil fermentasi, minyak esensial, dan beberapa produk petroleum.

Contoh distilasi *batch* sederhana diterapkan pada skala laboratorium. Umpan dimasukkan ke sebuah labu untuk dipanaskan pada suhu didih campuran. Dalam sistem tertutup, uap akan terbentuk terus-menerus untuk selanjutnya dikondensasikan melalui kondenser yang terhubung dengan bagian atas labu. Cairan umpan yang tersisa di dasar labu merupakan komponen yang bersifat kurang volatil atau pada proses kontinu biasa disebut sebagai produk *bottom*. Namun, dalam proses *batch* lebih dikenal dengan istilah *still*.

Sistem operasi *batch* cenderung bersifat *unsteady state*. Maksudnya, produk yang diperoleh bervariasi jumlahnya pada tiap satuan waktu. Proses distilasi serupa telah dirumuskan persamaannya oleh Lord Rayleigh yang dikenal dengan proses *differential distillation*. Dalam kasus tersebut, tidak ada *reflux* yang dikembalikan ke labu. Uap yang meninggalkan *still pot* dengan komposisi y_D diasumsikan setimbang dengan campuran *liquid* pada *still*. Untuk kondensasi total berlaku $y_D = x_D$. Rangkaian peralatan tersebut berguna untuk memisahkan campuran yang memiliki rentang titik didih yang jauh berbeda, seperti terlihat pada Gambar 2.3.

Gambar 2.3 Rangkaian alat distilasi diferensial skala laboratorium

Perhitungan distilasi diferensial di atas dapat diawali dari neraca massa total maupun neraca massa komponen. Berikut adalah susunan persamaan distilasi *batch*:

laju massa input – laju massa output ± laju reaksi pembentukan/pengurangan = laju massa akumulasi

Neraca massa total:

$$0 - D \pm 0 = \frac{dW}{dt} \quad (2.1)$$

$$-Ddt = dW \quad (2.2)$$